

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
14. Juni 2001 (14.06.2001)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 01/43168 A2

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: H01L 21/00

[DE/DE]; Maxdorfer Str. 21, 06366 Köthen (DE). PET-  
ZOLD, Matthias [DE/DE]; Strasse des Friedens 37,  
06127 Merseburg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE00/04359

(22) Internationales Anmeldedatum:  
5. Dezember 2000 (05.12.2000)

(74) Anwalt: GAGEL, Roland; Landsberger Str. 480a, 81241  
München (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): CA, JP, US.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT,  
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,  
NL, PT, SE, TR).

(30) Angaben zur Priorität:  
199 58 803.1 7. Dezember 1999 (07.12.1999) DE

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Aus-  
nahme von US*): FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT  
ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN  
FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Leonrodstr. 54, 80636  
München (DE).

**Veröffentlicht:**

— Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu  
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): BAGDAHN, Jörg

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen  
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on  
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe  
der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD FOR HANDLING SEMICONDUCTOR SUBSTRATES DURING PROCESSING AND/OR MACHINING

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM HANDHABEN VON HALBLEITERSUBSTRATEN BEI DER PROZESSIERUNG  
UND/ODER BEARBEITUNG

(57) Abstract: The invention relates to a method for handling semi-conductor substrates during processing and/or working proce-  
dures. In said method, semiconductor substrates are (1) connected to a carrier substrate (2), processed on the carrier substrate (2)  
and then removed from the carrier substrate. In order to separate the carrier substrate, one or more cutters (5) or tips are inserted  
parallel to the surface of the semiconductor substrate (1) in such a way that when the feed velocity is varied in the connecting region  
between the semi-conducting substrate (1) and the carrier-substrate (2), one or more fractures are generated in the connecting region.  
Said fractures propagate in the connecting region when the cutter (5) or the tips are further inserted and cause the separation of both  
substrates. The method enables simple handling of thin semi-conducting substrates during processing and/or machining without  
causing any appreciable amount of waste products.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Handhaben von Halbleitersubstraten bei der Pro-  
zessierung und/oder Bearbeitung. Bei dem Verfahren wird das Halbleitersubstrat (1) mit einem Trägersubstrat (2) verbunden, auf  
dem Trägersubstrat (2) prozessiert und anschliessend wieder vom Trägersubstrat gelöst. Zur Trennung vom Trägersubstrat werden  
eine oder mehrere Schneiden (5) oder Spitzen parallel zu einer Oberfläche des Halbleitersubstrates (1) derart mit variierender Vor-  
schubgeschwindigkeit in den Verbindungsbereich zwischen dem Halbleitersubstrat (1) und dem Trägersubstrat (2) eingeschoben,  
dass zunächst ein oder mehrere Anrisse in dem Verbindungsbereich erzeugt werden, die sich durch weiteres Einschieben der Schnei-  
den (5) oder Spitzen vollständig im Verbindungsbereich ausbreiten und zur Trennung der beiden Substrate führen. Das Verfahren  
ermöglicht die einfache Handhabung von dünnen Halbleitersubstraten bei der Prozessierung und/oder Bearbeitung, ohne dass nen-  
nenswerte Abfallprodukte entstehen.

WO 01/43168 A2

Verfahren zum Handhaben von Halbleitersubstraten bei  
der Prozessierung und/oder Bearbeitung

**Technisches Anwendungsgebiet**

5 Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren  
zum Handhaben von Halbleitersubstraten bei der Prozes-  
sierung und/oder Bearbeitung, bei dem das zu prozessie-  
rende Halbleitersubstrat mit einem Trägersubstrat ver-  
bunden, auf dem Trägersubstrat prozessiert und/oder be-  
10 arbeitet und anschließend von dem Trägersubstrat gelöst  
wird. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Vorrichtung  
zur Trennung von verbundenen Substraten bei der Durch-  
führung des Verfahrens.

15 Für viele Anwendungen von elektronischen Bauele-  
menten und insbesondere von integrierten Schaltungen  
kann es vorteilhaft sein, die Gesamtdicke der Halblei-  
terbereiche auf wenige Mikrometer zu beschränken. Der-  
art dünne Halbleiterbereiche haben eine sehr geringe  
20 Masse und eine sehr geringe Bauhöhe. Sie sind mecha-  
nisch flexibel und passen sich dem thermomechanischen  
Verhalten einer Unterlage an. Gerade in der Mikroelek-  
tronik und im Bereich der Mikrosystemtechnik, bei-  
spielsweise im Einsatz bei Chipkarten, sind derartige  
25 dünne mikroelektronische bzw. mikromechanische Bauele-  
mente von großem Interesse.

- 2 -

### Stand der Technik

Für die Herstellung und Handhabung von dünnen Halbleitersubstraten oder Halbleiterwafern sind unterschiedliche Verfahren bekannt. In der Siliziumtechnologie stehen zunächst Wafer zur Verfügung, die eine Dicke von typischer Weise 500 - 1000  $\mu\text{m}$  bei einem Durchmesser von derzeit 100 mm bis 300 mm aufweisen. Nach der halbleitertechnologischen Fertigung zur Erzeugung der Schaltkreise oder Bauelemente werden die Wafer und damit die einzelnen Chips des Wafers auf Restdicken von 200  $\mu\text{m}$  oder darunter gedünnt, um im Gehäuse oder auf Chipkarten eingebaut werden zu können. Eine Prozessierung der Bauelemente oder Schaltkreise auf freitragenden, bereits gedünnten Wafern scheidet in der Regel aus, da sich die Wafer mit abnehmender Materialdicke zunehmend verformen oder brechen.

Zum Rückdünnen von Wafermaterial nach der Prozessierung werden mechanische und chemische Verfahren, wie beispielsweise Schleifen oder Ätzen, oder eine Kombination beider Verfahren eingesetzt. Diese Technik hat jedoch den Nachteil, dass für das Rückdünnen einerseits ein hoher Zeitaufwand erforderlich ist und andererseits das abgetragene Wafermaterial zerstört wird, so dass es umweltgerecht entsorgt werden muss. Weiterhin besteht die Gefahr, dass die bereits auf dem Wafer prozessierten Bauelemente durch einen fehlerhaften Dünnungsprozess zerstört werden. Die Waferrückseite, d.h. die abgedünnte Seite, besitzt eine erhöhte Rauigkeit, wodurch sich die Festigkeit der Bauelemente reduziert.

- 3 -

Ein weiteres bekanntes Verfahren zum Prozessieren dünner Halbleitersubstrate besteht im Einsatz der so genannten SOI-Wafer. Bei einer Ausgestaltung dieser Technik, der so genannten BESOI-Technik, werden zwei  
5 oxidierte Siliziumwafer durch thermisches Bonden und die damit hergestellten kovalenten Bindungen fest verbunden. Anschließend wird einer der beiden Wafer auf die Nutzdicke rückgedünnt. Der auf diese Weise entstandene Verbund aus einem dünnen Halbleitersubstrat auf  
10 einem dickeren Trägerwafer wird in der gewünschten Weise prozessiert. Anschließend wird das dünne Halbleitersubstrat vom Trägerwafer gelöst. Auf diese Weise wird die Gefahr einer Zerstörung der Bauteilschicht durch den Dünnungsprozess vermieden, da die Halbleiterschicht  
15 erst nach dem Dünnen prozessiert wird.  
Für die Trennung der prozessierten Halbleiterschicht vom Trägersubstrat sind unterschiedliche Verfahren bekannt. Die Entfernung des Trägerwafers erfolgt hierbei in der Regel durch Schleifen oder durch nass- oder  
20 trockenchemisches Ätzen. Beide Verfahren führen jedoch zu einer vollständigen Zerstörung des Trägerwafers und zu einer Gefährdung der bereits prozessierten Halbleiterschicht.

25 Die JP 7302889A beschreibt ein Verfahren zur Herstellung eines SOI-Wafers, bei dem eine poröse Siliziumschicht zwischen der dünnen Halbleiterschicht und dem Trägersubstrat gebildet wird. Bei der Entfernung des Trägersubstrates wird dabei lediglich die poröse Siliziumschicht weggeätzt, so dass das Trägersubstrat un-  
30 versehrt bleibt.

- 4 -

Ein weiteres Verfahren zur Abtrennung einer dünnen Halbleiterschicht von einem Trägersubstrat ist in der DE 196 54 791 A1 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird die dünne Halbleiterschicht mit Durchgangslöchern versehen, die sich bis in eine zwischen der Halbleiterschicht und dem Trägersubstrat vorliegenden Trennschicht erstrecken. Anschließend wird ein Ätzmittel zum entfernen der Trennschicht in die Durchgangslöcher eingebracht und die Halbleiterschicht auf diese Weise von dem Trägersubstrat getrennt. Das Verfahren ermöglicht somit ebenfalls die Herstellung bzw. Handhabung eines dünnen Halbleitersubstrates ohne ein Rückschleifen oder Rückätzen eines monokristallinen Wafers.

Die letztgenannten Verfahren erfordern jedoch jeweils eine spezielle Trennschicht zwischen dem dünnen Halbleitersubstrat und dem Trägersubstrat, die für ein Ätzmittel zugänglich sein muss. Zudem muss diese Trennschicht weggeätzt werden, so dass wiederum Abfallprodukte anfallen, die umweltgerecht entsorgt werden müssen.

Neben den oben angeführten festen Verbindungen zwischen den Substraten können vor der eigentlichen Prozessierung zwei Wafer auch ohne weitere äußere Einwirkung durch reinen mechanischen Kontakt ihrer Oberflächen miteinander verbunden werden. Beim mechanischen Kontakt der Wafer wird eine Adhäsion über relativ schwache reversible Bindungen wie Wasserstoffbrückenbindungen oder van der Waals-Bindungen erreicht. Bei Restpartikeln oder Kontaminationen in der Verbindungsfläche oder bei ungenügender Planarität der Wafer können Hohlräume im Verbindungsbereich entstehen, die über IR-Techniken nachweisbar sind. In diesem Fall müssen

- 5 -

die Wafer in der Regel wieder voneinander getrennt und gegebenenfalls nochmals gereinigt oder ausgesondert werden. Angesichts der sehr geringen Festigkeit und Reversibilität der Bindung zwischen den Wafern kann zu  
5 diesem Zeitpunkt die Bondverbindung leicht wieder getrennt werden.

Zur Trennung dieser lockeren Bondverbindungen zwischen zwei Wafern ist es beispielsweise aus der EP 0 824 267 bekannt, die Trennung der Halbleitersubstrate  
10 Trennung durch eine seitliche mechanische Belastung der Verbindung mit Klingen oder Schneiden zu unterstützen. Auch die US 5,897,743 sowie die JP 7-240355 beschreiben vergleichbare Verfahren. Der Waferverbund wird bei diesen Verfahren stets nur am Rande belastet, um die Trennung  
15 zu initiieren und um Schädigungen der Waferoberflächen zu vermeiden. So wird in der US 5,897,743 beispielsweise durch die Geometrie der Schneide besonderen Wert darauf gelegt, dass die Schneide nicht zu weit in die Verbindung eindringt. Infolge der geringen Festigkeit  
20 der Verbindung breitet sich der erzeugte Anriss selbständig über die gesamte Waferfläche, d.h. über eine Länge von ca. 10 cm aus.

Die letztgenannten Verfahren sind für die hier vorliegenden Anwendungsfälle jedoch nicht geeignet, in  
25 denen der Waferverbund bereits prozessiert und/oder bearbeitet wurde, bevor die Verbindung getrennt wird. Die Festigkeit der Waferbondverbindung ist hierbei wesentlich höher. So wird die Festigkeit der Verbindung nach dem Initialkontakt beispielsweise durch nachfolgende  
30 Auslagerungen des Verbunds bei erhöhter Temperatur (100°C bis 1100°C) oder auch in Verbindung mit einer Plasmavorbehandlung der Oberfläche wesentlich gesteigert. Je höher die Auslagerungstemperatur ist, desto

- 6 -

höher steigt die Festigkeit. Dies wird für verschiedene Anwendungen, beispielsweise bei der Verbindungstechnik für Mikrosysteme, gezielt durchgeführt, kann aber auch als Nebeneffekt auftreten, wenn der Waferverbund aus  
5 anderen Gründen erwärmt werden muss, z.B. um Oberflächen thermisch zu oxidieren. Wird der Waferverbund als Handlingsystem eingesetzt, müssen auch diese sehr festen Bondverbindungen wieder getrennt werden. Diese Verbindungen sind bisher nur mit den erstgenannten Ver-  
10 fahren trennbar.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zum Handhaben von Halbleitersubstraten bei der Prozessierung und/oder Bearbeitung an-  
15 zugeben, das die einfache Handhabung von insbesondere dünnen Halbleitersubstraten ohne die Notwendigkeit spezieller Zwischenschichten auf einem Trägersubstrat ermöglicht und keine nennenswerten Abfallprodukte verursacht.

20

### Darstellung der Erfindung

Die Aufgabe wird mit dem Verfahren nach Patentanspruch 1 gelöst. Eine Vorrichtung zur Trennung verbundener Substrate bei der Durchführung des Verfahrens ist  
25 in Anspruch 17 angegeben. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens und der Vorrichtung sind Gegenstand der Unteransprüche.

30 Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird das zu prozessierende Halbleitersubstrat mit einem Trägersubstrat verbunden, auf dem Trägersubstrat prozessiert und/oder bearbeitet und anschließend vom Trägersubstrat ge-

- 7 -

trennt. Zur Trennung vom Trägersubstrat werden eine oder mehrere Schneiden oder Spitzen parallel zu einer Oberfläche des Halbleitersubstrates derart mit variierender Vorschubgeschwindigkeit in den Verbindungsbereich zwischen dem Halbleitersubstrat und dem Trägersubstrat eingeschoben, dass zunächst ein oder mehrere Anrisse in dem Verbindungsbereich erzeugt werden, die sich durch weiteres Einschieben der Schneiden oder Spitzen vollständig im Verbindungsbereich ausbreiten und zur Trennung der beiden Substrate führen.

Für diese Trennung ist somit keine spezielle Zwischenschicht zwischen dem Trägersubstrat und dem Halbleitersubstrat erforderlich. Die Trennung erfolgt rein mechanisch ohne Einsatz eines Ätzverfahrens. Es entstehen daher keine oder nur sehr wenige zu entsorgende Abfallprodukte. Der nicht benötigte Bereich des Trägersubstrates, welcher beim konventionellen Rückdünnen zerstört wird, bleibt beim vorliegenden Verfahren erhalten und steht als neues Ausgangssubstrat für das Verfahren wieder zur Verfügung. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt die technologische Prozessierung dünner Halbleitersubstrate, insbesondere Wafer, indem durch die Verbindung mit dem Trägersubstrat ein steiferer Verbund erzeugt wird, der sich während der Handhabung, d.h. insbesondere bei der Prozessierung und/oder Bearbeitung, nicht verbiegt und eine höhere mechanische Belastbarkeit aufweist. Damit ist das Durchlaufen aller Prozessschritte möglich. Die resultierende Oberfläche an der Rückseite des Halbleitersubstrates besitzt nach der Trennung vom Trägersubstrat eine deutlich geringere Rauheit als eine rückgeschliffene Waferoberfläche. Das Verfahren eignet sich insbesondere für die Handhabung



- 8 -

dünner Halbleitersubstrate bzw. Halbleiterschichten mit einer Dicke unterhalb von 300  $\mu\text{m}$ .

Bei dem vorliegenden Verfahren werden die beiden  
5 Substrate zunächst mit einem geeigneten Fügeverfahren  
miteinander verbunden. Hierbei kann beispielsweise das  
Verfahren des direkten Waferbondens angewendet werden.  
Das Halbleitersubstrat ist dabei in der Regel dünner  
als das Trägersubstrat, das zur Versteifung des entste-  
10 henden Verbundes dient. Die beiden Substrate können aus  
dem gleichen oder aus unterschiedlichen Materialien be-  
stehen. So kann beispielsweise auch ein Trägersubstrat  
aus einem Glasmaterial eingesetzt werden. Die beiden  
Substrate können im Bereich der Fügezone auch eine  
15 Oberflächenschicht oder eine Oberflächenstrukturierung,  
wie Vertiefungen oder Gruben, aufweisen. Durch die Aus-  
wahl der Parameter bei der Herstellung der Fügeverbin-  
dung oder eine gezielte Nachbehandlung (z.B. Auslage-  
rung bei einer bestimmten erhöhten Temperatur) ist eine  
20 definierte Einstellung der Haftfestigkeit zwischen  
Halbleiter- und Trägersubstrat möglich.

Nach dem Verbinden der beiden Substrate kann der  
dadurch entstandene Verbund auf verschiedene Weise pro-  
zessiert und/oder bearbeitet werden. So kann das Halb-  
25 leitersubstrat beispielsweise einer Beschichtung, einer  
Implantation, einer Strukturierung, einer Dotierung,  
einer Wärmebehandlung oder anderen typischen Bearbei-  
tungsschritten der Halbleitertechnologie unterzogen  
werden. Die Art der Prozessierung ist hierbei nicht auf  
30 niedrige Temperaturen beschränkt. Es können vielmehr  
auch Temperaturen oberhalb von 1000° C auftreten.

Nach der Prozessierung und/oder Bearbeitung werden  
in der Verbindungsebene bzw. Verbindungsschicht zwi-

schen den beiden Substraten ein oder mehrere Anrisse erzeugt, die sich in definierter Weise in dieser Fügeverbindung ausbreiten. Dies führt schließlich zur Trennung der beiden Substrate. Die Trennung erfolgt hierbei  
5 parallel zur Substrat- oder Waferoberfläche, ohne das Substratmaterial zu beschädigen.

Nach dem Trennen liegen das bearbeitete Halbleitersubstrat und das Trägersubstrat einzeln vor. Das Halbleitersubstrat kann nun durch Sägen zu einzelnen  
10 Bauelementen bzw. Chips vereinzelt werden. Das Trägersubstrat steht nach einer eventuell notwendigen Oberflächenbehandlung, wie Polieren und Reinigen, wieder als neues Trägersubstrat zur Verfügung.

15 Bei einer Ausgestaltung des Verfahrens erfolgt das Zerteilen in einzelne Chips bereits vor dem Trennen der beiden Substrate durch Sägen des gesamten Verbundes. In diesem Fall werden die Bauelemente bzw. Chips des Halbleitersubstrates einzeln von den zerteilten Einheiten  
20 des Trägersubstrates gelöst.

Es versteht sich von selbst, dass das Verfahren auch mit einem Halbleitersubstrat durchgeführt werden kann, das die gleiche Dicke wie das Trägersubstrat aufweist. Das Halbleitersubstrat kann beispielsweise auch  
25 erst nach dem Verbinden mit dem Trägersubstrat auf eine geringere Dicke rückgedünnt werden.

Die Erzeugung der ein oder mehreren Anrisse im  
30 Verbindungsbereich, d.h. in der Verbindungsebene oder einer Verbindungsschicht zwischen den beiden Substraten, erfolgt mechanisch. Die mechanische Einbringung

- 10 -

hat den Vorteil einer guten Kontrolle der Erzeugung der Anrisse.

Die Anrisse werden hierbei durch Einschieben von beispielsweise metallischen Schneiden oder Klingen von  
5 der Seite in die Verbindungsebene bzw. Verbindungsschicht zwischen Halbleitersubstrat und Trägersubstrat erzeugt. Durch weiteres Einschieben dieser Spitzen oder Klingen breiten sich die Anrisse schließlich in der gesamten Verbindungszone zwischen beiden Substraten aus,  
10 so dass sich die Substrate voneinander lösen.

Hierbei ist zu beachten, dass im ersten Stadium der Trennung die Belastung durch die Schneiden oder Klingen keineswegs größer sein darf als die (zügige) Festigkeit der Verbindung, um eine Trennung mittels  
15 subkritischem Risswachstum zu erreichen. Die Belastung muss vielmehr kleiner sein als die zügige Festigkeit, jedoch größer als die Ermüdungsfestigkeit bzw. Dauerfestigkeit. Hierdurch werden zunächst Anrisse durch das so genannte subkritische Risswachstum erzeugt. Ohne  
20 diese Ermüdungsanrisse ist eine Trennung der gebondeten Grenzfläche nicht möglich. Im zweiten Stadium der Trennung kann die Geschwindigkeit erhöht werden, jedoch darf auch hier eine bestimmte Grenzggeschwindigkeit nicht überschritten werden. Auch hier bleibt die Beanspruchung unterhalb der Grenze der zügigen Festigkeit.  
25

Besonders vorteilhaft ist daher, wenn die Klingen oder Spitzen zunächst sehr langsam, das heißt mit Vorschubgeschwindigkeiten von  $\leq 1 \mu\text{m/s}$ , in den Verbindungsbereich eingeschoben und mit zunehmender Eindringtiefe schneller vorwärts bewegt werden.  
30

- 11 -

In einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens wird die Vorschubgeschwindigkeit beim Einschieben der Klingen oder Spitzen in Stufen erhöht. Nach der ersten Stufe mit langsamer Geschwindigkeit wird zunächst eine  
5 Pause eingelegt, während der kein Vorschub erfolgt. In diesem Stadium sorgen Ermüdungseffekte, das so genannte subkritische Risswachstum, zur Ausbildung von einem oder mehreren Anrissen mit einer Länge von wenigen  $\mu\text{m}$  bis zu einigen mm. Die Risswachstumsgeschwindigkeit be-  
10 trägt hierbei zwischen 0,1 nm/s und 100  $\mu\text{m/s}$ . Nach dem Ausbilden dieser Anrisse wird die Vorschubgeschwindigkeit in Stufen gesteigert, da sich die Risse in diesen Stadien schneller ausbreiten. Bei diesen weiteren Stufen kann ebenfalls vor jeder Erhöhung der Vorschub-  
15 geschwindigkeit eine Vorschubpause eingelegt werden. Durch diese Pausen wird ein kontrollierteres Risswachstum erreicht. Die Risswachstumsgeschwindigkeit kann zusätzlich durch die Erhöhung der Umgebungstemperatur und/oder durch den Zusatz eines geeigneten flüssigen  
20 oder gasförmigen Mediums erhöht werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die über die Klinge bzw. Spitze auf die Fügeverbindung während des  
25 Einschiebens wirkende Kraft, beispielsweise über eine Kraftmessdose zwischen Antrieb und Klinge, gemessen. Die gemessenen Werte werden zur Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit eingesetzt. Eine mit zunehmendem Vorschub ansteigende Kraft zeigt an, dass kein Anriss vor-  
30 handen ist oder ein vorhandener Anriss langsamer wächst als die Klinge bzw. Spitze in die Fügeverbindung eingeschoben wird. Bei einer konstanten Kraft sind Riss- und Vorschubgeschwindigkeit gleich groß. Bei einer sinken-

- 12 -

den Kraft ist die Rissgeschwindigkeit größer als die Vorschubgeschwindigkeit der Klinge. Die Anrisserzeugung ist beendet, wenn sich ein geeigneter Riss von einigen mm Länge ausgebildet hat. Dies wird durch ein starkes  
5 Abfallen der Kraft bei zunehmender Belastung signalisiert.

Nach der Erzeugung eines derart großen Anrisses kann der Trennprozess mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten, beispielsweise 1 bis 10 mm/s, fortgesetzt werden.  
10 Der Riss breitet sich dann mit dieser Geschwindigkeit über den gesamten Substratquerschnitt in der Fügezone aus, wodurch die beiden Substrate vollständig voneinander getrennt werden.

15 Die dargelegten Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der gemessenen Kraft und der Ausbreitung der Anrisse lässt sich vorteilhaft zur Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit einsetzen. So kann bei einer unter einen vorgebbaren Grenzwert abgesunkenen Kraft die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden, da sich in diesem Fall  
20 der Riss bereits mit einer im Vergleich zur Vorschubgeschwindigkeit höheren Geschwindigkeit ausbreitet. Ebenso kann eine Kraftänderung über ein bestimmtes Zeitintervall als Grenzwert für eine Erhöhung oder Erniedrigung der Vorschubgeschwindigkeit herangezogen werden.  
25 Bei einer Erhöhung der Kraft über einen bestimmten Grenzwert kann die Vorschubgeschwindigkeit reduziert werden, um eine mögliche Zerstörung der Substrate zu verhindern. Unter einer Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit ist in diesem Zusammenhang auch eine Vorschubpause (Vorschubgeschwindigkeit = 0) zu verstehen.  
30 Die Vorschubpause kann wiederum bei der Unterschreitung

- 13 -

eines Grenzwertes für die Kraft beendet und die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend erhöht werden.

5       Während des Trennprozesses wird das Halbleitersubstrat vorzugsweise über einen Vakuumsauger gehalten oder mit einer Zugkraft senkrecht zur Substratoberfläche beaufschlagt.

10       Das Verbinden der beiden Substrate zu Beginn des Verfahrens erfolgt vorzugsweise derart, dass zwischen beiden Substraten nach dem Verbinden entweder nur eine natürliche Oxidschicht (10 - 30 Å Dicke) oder eine bzw. zwei thermische Oxidschichten mit einer Dicke von typischerweise etwa 500 nm vorliegen. Für die spätere Trennung ist die Art der Verbindung der beiden Substrate  
15       unerheblich. Ebenso kann die Verbindung einer Temperaturbehandlung unterworfen werden, um die Adhäsion zwischen beiden Substraten zu erhöhen. Auch in diesem Fall lassen sich die beiden Substrate mit dem Trennverfahren  
20       problemlos voneinander lösen.

      Die Vorrichtung zur Trennung der beiden Substrate besteht aus einer Halterung für die Substrate, zumindest einer Schneide oder Spitze zum Erzeugen des Anrisses in dem Verbindungsbereich zwischen den beiden Substraten, einer Vorschubeinrichtung zum kontrollierten  
25       Einschieben der Schneide oder Spitze in den Verbindungsbereich sowie einer Steuerung zur Änderung der Vorschubgeschwindigkeit der Vorschubeinrichtung während  
30       des Einschiebens der Schneide oder Spitze in den Verbindungsbereich. Vorzugsweise sind mehrere Schneiden oder Spitzen symmetrisch um die Halterung angeordnet. Bei einem Einsatz mehrerer Schneiden haben diese vor-

- 14 -

zugsweise einen trapezförmigen Umriss, um sie möglichst tief in den Verbindungsbereich zwischen den beiden Substraten einschieben zu können, ohne dass sie dabei aneinander stoßen. Die Dicke der Schneiden oder Spitzen  
5 liegt im Bereich von unter 1 mm, wobei die Spitze bzw. der spitz zulaufende Bereich der Klinge natürlich deutlich schmaler sein muss.

#### Wege zur Ausführung der Erfindung

10

Das erfindungsgemäße Verfahren sowie die zugehörige Vorrichtung werden nachfolgend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens nochmals beispielhaft anhand der beiliegenden Figuren erläutert. Hierbei zeig-  
15 gen:

Figur 1 ein erstes Ausführungsbeispiel für die grundsätzliche Handhabung des Halbleitersubstrates bei der Durchführung des erfindungsgemäßen  
20 Verfahrens;

Figur 2 ein zweites Beispiel für die grundsätzliche Handhabung des Halbleitersubstrates bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

25 Figur 3 ein Beispiel für eine Vorrichtung zur Trennung der Substrate beim vorliegenden Verfahren;

Figur 4 ein Messdiagramm, das die Kraft, mit der die Klinge der Vorrichtung in die Fügeverbindung gedrückt wird, als Funktion der Zeit für unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten dar-  
30 stellt; und

- 15 -

Figur 5 ein drittes Beispiel für die grundsätzliche Handhabung des Halbleitersubstrates bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

5

Bei einem ersten Ausführungsbeispiel, wie dies in Figur 1 dargestellt ist, werden dünne Bauelemente gefertigt, für die ein Prozesswafer bereits in der erforderlichen Dicke vorliegt bzw. gefertigt werden kann. Dieser Prozesswafer 1 mit einer Dicke von beispielsweise 200  $\mu\text{m}$  wird mit einem Trägerwafer 2 mit einer Dicke von beispielsweise 525  $\mu\text{m}$  verbunden. Der Trägerwafer besitzt auf der zu fügenden Oberfläche eine dünne Siliziumdioxidschicht (in der Figur nicht zu erkennen), die durch thermische Oxidation erzeugt wurde. Die Verbindung der beiden Wafer erfolgt mit dem Verfahren des direkten Waferbondens (Schritte 1. und 2.). Im nächsten Schritt wird der obenliegende Prozesswafer 1 im Rahmen einer Prozessierung mit den für die herzustellenden Bauelemente erforderlichen mikroelektronischen oder mikromechanischen Strukturen 3 versehen (Schritt 3.).

Anschließend werden die gebondeten Wafer 1, 2 gezielt wieder voneinander gelöst. Hierzu werden die Wafer mit einer mechanischen Belastung in vertikaler und horizontaler Richtung beaufschlagt (Schritt 4.). Dies erfolgt durch eine vertikale Vakuumansaugung und eine kombinierte Anrisserzeugung durch seitlich eingeschobene Teile (nicht dargestellt). In der gebondeten Grenzfläche bzw. in deren Umgebung breitet sich ein Riss parallel zur Waferoberfläche aus, der den Prozesswafer 1 vom Trägerwafer 2 trennt (Schritt 5.). Der abgelöste Trägerwafer kann nach einer eventuell notwendigen Ober-



- 16 -

flächenbehandlung wieder als neuer Trägerwafer für das Verfahren eingesetzt werden. Der Prozesswafer 1 wird anschließend zu Bauelementen vereinzelt (in der Figur nicht gezeigt).

5

Figur 2 zeigt eine weitere Variante des vorliegenden Verfahrens, mit dem ultra-dünne Bauelemente hergestellt werden können, für die kein Prozesswafer in der erforderlichen Dicke vorliegt. Bei diesem Verfahren wird ein verfügbarer dünner Prozesswafer 1 auf gleiche Weise wie beim Ausführungsbeispiel der Figur 1 mit einem Trägerwafer verbunden (Schritte 1. und 2.). Der Prozesswafer 1 hat hierbei eine Dicke von beispielsweise 200  $\mu\text{m}$ , der Trägerwafer 2 eine Dicke von beispielsweise 525  $\mu\text{m}$ . Der Prozesswafer 1 wird im nächsten Schritt durch konventionelle Abdünntechniken weiter bis zur gewünschten Dicke rückgedünnt und nachfolgend poliert. Hierdurch kann ein sehr dünner Prozesswafer bereitgestellt werden (Schritt 3.). Durch die Verbindung mit dem steifen Trägerwafer 2 wird ein übermäßig starkes Durchbiegen bzw. ein Brechen des Prozesswafers 1 vermieden. Die weiteren Verfahrensschritte erfolgen wie bereits in Zusammenhang mit Figur 1 erläutert, wobei die gleichen Bezugszeichen für die gleichen Elemente verwendet werden. Auf diese Weise können Bauelemente in extrem dünnen Halbleitersubstraten problemlos gefertigt werden.

Figur 3 zeigt ein Beispiel für ein Trennwerkzeug zur Trennung der beiden Wafer der Ausführungsbeispiele der Figuren 1 oder 2. In der Figur sind die Aufnahmevorrichtung 4 für den Waferverbund sowie vier Klingen 5 zum Einschieben in die Fügeverbindung zwischen den Wa-

- 17 -

fern dargestellt. Die Vorrichtung weist weiterhin für jede der Klingen eine Vorschubeinheit 6 auf, mit der geeignete Vorschubgeschwindigkeiten erzielt werden können. Als Vorschubeinheiten werden bei diesem Beispiel 5 elektrische Antriebe mit mechanischer Übersetzung verwendet. Die Klingen 5 sind trapezförmig, so dass ein tiefes Einschieben der Klingen in die Fügeverbindung ermöglicht wird, ohne dass sich diese gegenseitig beeinflussen. Die Klingendicke beträgt im vorliegenden 10 Beispiel 600  $\mu\text{m}$ . Durch die symmetrische Anordnung der Klingen um die Halterung wird eine gleichmäßige Belastung der Fügeverbindung ermöglicht.

Im folgenden Ausführungsbeispiel werden die Parameter 15 für die Durchführung der Trennung eines Trägerwafers mit einer Dicke von 525  $\mu\text{m}$  von einem Prozesswafer mit einer Dicke von 250  $\mu\text{m}$  angegeben, wobei beide Wafer auf ihren zu verbindenden Oberflächen mit thermischem Oberflächenoxid mit einer Dicke von 500 nm beschichtet 20 sind. Zur Herstellung der Fügeverbindung wird zunächst eine RCA-Waferreinigung durchgeführt. Das Bonden der beiden Wafer erfolgt bei Raumtemperatur. Bei der nachfolgenden Prozessierung zur Herstellung der Bauelemente im Prozesswafer, wie dies beispielsweise bei den Ausführungsbeispielen der Figuren 1 und 2 erfolgt, treten 25 Prozesstemperaturen bis zu 1100° C auf.

Die Trennung erfolgt in der bereits beschriebenen Weise durch seitlichen Einschub von vier Klingen mit einer Vorrichtung, wie sie in der Figur 3 dargestellt 30 ist. Die Trennung erfolgt hierbei zwischen den beiden thermischen Oxidschichten.

- 18 -

Zur Trennung ist es notwendig, dass im Anfangsstadium des Einschiebens der Klingen Anrisse in der Fügezone erzeugt werden. Die Anrisserzeugung erfolgt im vorliegenden Fall durch ein im Vergleich zur eigentlichen Trennung langsames Einschieben der Klingen in die Fügeverbindung. Zusätzlich wird der Vorschub für eine definierte Zeit gestoppt. In diesem Stadium sorgen die Ermüdungseffekte zur Ausbildung von einem oder mehreren Anrissen. Die Risswachstumsgeschwindigkeit beträgt dabei 0,1 nm/s bis 100 µm/s. Tabelle 1 gibt ein Beispiel für die Vorschubparameter zur Anrisserzeugung an, bei der die Vorschubgeschwindigkeit in Stufen erhöht wird, wobei zwischen den einzelnen Stufen jeweils eine Vorschubpause eingelegt wird.

Tabelle 1:

Schritt	Zeit/s	Vorschubgeschwindigkeit in µm/s
1a	0 - 60	0,1
1b	60 - 120	0
2a	120 - 180	1
2b	180 - 240	0
3a	240 - 300	10
3b	300 - 360	0
4a	360 - 420	100
4b	420 - 480	0
5	> 480	1000

Bei der Anwendung dieser Parameter wird ein hervorragendes Trennergebnis erzielt. Eine Messung der über die Klinge auf die Fügeverbindung wirkenden Kraft ergibt die in Figur 4 aufgezeigte Kurve. In dieser Figur ist die Kraft, mit der die Klinge in die Fügever-

- 19 -

bindung gedrückt wird, als Funktion der Zeit für die unterschiedlichen Stufen bzw. Vorschubgeschwindigkeiten der Tabelle 1 aufgetragen. Die einzelnen Stufen sind in der Tabelle gekennzeichnet. Man erkennt sehr gut die zu

5 Beginn jeder Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit sprunghaft ansteigende Kraft, die sich nach der Abschaltung des Vorschubs jeweils wieder erniedrigt. Bei späteren Stufen ist deutlich der Effekt einer nachlassenden Kraft bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit zu

10 erkennen, der auf ein schnelleres Risswachstum hinweist. Der starke Abfall der Kraft bei zunehmender Belastung von Schritt 4 zu Schritt 5 ist ein deutliches Anzeichen dafür, dass ein geeignet großer Anriss in der Verbindungszone zwischen beiden Wafern entstanden ist.

15 Nach der Erzeugung dieses Anrisses kann der Trennprozess mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten von beispielsweise 1 - 10 mm/s fortgesetzt werden. Der Riss breitet sich dann mit dieser Geschwindigkeit über den gesamten Waferquerschnitt aus, wodurch die beiden Wafer

20 vollständig getrennt werden.

Eine Nachbehandlung des Prozesswafers ist in der Regel nicht erforderlich. Im Bedarfsfall kann das Oberflächenoxid durch Polieren oder Ätzen entfernt werden.

25 Der Trägerwafer kann nach einer Reinigung oder gegebenenfalls nach einer Entfernung des Oxides durch Polieren oder Ätzen und einer Neuoxidation erneut als Trägerwafer eingesetzt werden.

30 Figur 5 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel für die Anwendung des vorliegenden Verfahrens zur Erzeugung mikromechanischer Strukturen.

- 20 -

Hierbei wird ein SOI-Wafer (7) mit einer dünnen Halbleiterschicht (1), einem Oxid (9) und dem Träger- bzw. Handling-Wafer (2) bereitgestellt (Fig. 5a) und die Oberfläche der Halbleiterschicht (1), beispielsweise durch einen Ätzschritt, strukturiert (Fig. 5b). Anschließend wird der auf diese Weise prozessierte SOI-Wafer (7) mit einem zweiten Wafer (8) verbunden, so dass die strukturierte Halbleiterschicht (1) zwischen dem Trägerwafer (2) und dem weiteren Wafer (8) liegt (Fig. 5c). Nach dieser Verbindung folgt die Trennung der beiden Substrate zwischen der strukturierten Halbleiterschicht (1) und dem Träger-Wafer (2) mit dem vorliegenden Verfahren durch entsprechendes vorschubgesteuertes Einschieben einer oder mehrerer Klingen in die Oxidschicht (9) oder die gebondete Grenzfläche (Fig. 5d). Anschließend wird das verbleibende Oxid (9) beispielsweise durch einen Ätzschritt entfernt. auf diese Weise kann eine dünne Halbleitermembran über einer Kavität hergestellt werden, wie sie schematisch in Fig. 5e1) dargestellt ist. Im weiteren Beispiel der Fig. 5e2 wird nach der Entfernung des restlichen Oxides eine weitere Strukturierung der Halbleiterschicht (1), beispielsweise durch einen Ätzschritt durchgeführt, so dass eine frei bewegliche Struktur erzeugt wird.

25

Unabhängig von den angeführten Ausführungsbeispielen und bevorzugten Ausführungsformen muss oberhalb einer bestimmten Festigkeit der Bondverbindung zwischen den Substraten eine sorgfältige Steuerung des anfänglichen Belastungsprozesses zur Erzielung eines Ermüdungs-Anrisses sowie des Einschubprozesses der Klinge erfolgen. Dafür ist die Kenntnis der dabei ablaufenden Me-

30

- 21 -

chanismen (subkritisches Risswachstum) erforderlich, die auch durch vorausgehende quantitative Untersuchungen erhalten werden kann. Die Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte der Belastung und Vorschubgeschwindigkeit der Klinge kann durch folgende alternative Maßnahmen sichergestellt werden:

- Vorgabe eines geeigneten Vorschub-Geschwindigkeitsprofils (Vorschubsteuerung), wobei z.B. anfangs geringe, später höhere Einschubgeschwindigkeiten vorgesehen werden können;
- Geschwindigkeitsregelung des Vorschubs, wobei der Vorschub registriert und ein Regelsignal abgeleitet wird;
- analog über eine Kraftsteuerung der Vorschubgeschwindigkeit; oder
- über eine Kraftregelung der Vorschubgeschwindigkeit.

Bei Durchführung des Trennprozesses ohne Regelung kann alternativ zur Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bzw. Risslänge auch ein Belastungsprofil in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bzw. Risslänge vorgegeben werden.

- 22 -

Bezugszeichenliste

	1	dünner Prozesswafer bzw. Halbleiterschicht
5	2	Trägerwafer
	3	Bauelementstruktur
	4	Halterung für Wafer
	5	Klingen
	6	Vorschubeinrichtung
10	7	SOI-Wafer
	8	weiterer Wafer
	9	Oxidschicht
15		

Patentansprüche

1. Verfahren zum Handhaben von Halbleitersubstraten bei der Prozessierung und/oder Bearbeitung, bei dem das zu prozessierende Halbleitersubstrat (1) mit einem Trägersubstrat (2) verbunden ist oder wird, auf dem Trägersubstrat (2) prozessiert und/oder bearbeitet und anschließend vom Trägersubstrat (2) getrennt wird, dadurch gekennzeichnet,  
dass zur Trennung vom Trägersubstrat (2) eine oder mehrere Schneiden (5) oder Spitzen parallel zu einer Oberfläche des Halbleitersubstrates (1) derart mit variierender Vorschubgeschwindigkeit in den Verbindungsbereich zwischen dem Halbleitersubstrat (1) und dem Trägersubstrat (2) eingeschoben werden, dass zunächst ein oder mehrere Anrisse in dem Verbindungsbereich erzeugt werden, die sich durch weiteres Einschieben der Schneiden (5) oder Spitzen vollständig im Verbindungsbereich ausbreiten und zur Trennung der beiden Substrate führen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,  
dass die Schneiden (5) oder Spitzen mit einer Vorschubgeschwindigkeit in den Verbindungsbereich eingeschoben werden, die von einem anfänglichen ersten Wert auf einen höheren zweiten Wert gesteigert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,



- 24 -

dass der anfängliche erste Wert bei  $\leq 1 \mu\text{m/s}$  und der höhere zweite Wert bei  $> 1 \mu\text{m/s}$  liegt.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3,  
5 dadurch gekennzeichnet,  
dass die Vorschubgeschwindigkeit in Stufen erhöht wird.

5. Verfahren nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
10 dass nach der ersten und gegebenenfalls weiteren Stufen  
der Vorschub für ein bestimmtes Zeitintervall unterbro-  
chen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1,  
15 dadurch gekennzeichnet,  
dass die über die ein oder mehreren Schneiden (5) oder  
Spitzen auf den Verbindungsbereich ausgeübte Kraft wäh-  
rend des Einschiebens gemessen und zur Steuerung der  
Vorschubgeschwindigkeit herangezogen wird.

20  
7. Verfahren nach Anspruch 8,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Vorschubgeschwindigkeit erhöht wird, wenn die  
gemessene Kraft unter einen ersten vorgebbaren Wert ab-  
25 gesunken ist.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Vorschubgeschwindigkeit erniedrigt wird, wenn  
30 die gemessene Kraft einen zweiten vorgebbaren Wert er-  
reicht hat.

- 25 -

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Halbleitersubstrat (1) bei der Trennung mit  
einer Zugkraft senkrecht zu einer Oberfläche des Halb-  
5 leitersubstrates (1) beaufschlagt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Verbinden des Halbleitersubstrates (1) mit dem  
10 Trägersubstrat (2) durch ein Fügeverfahren erfolgt.
11. Verfahren nach Anspruch 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Verbinden durch ein Waferbond-Verfahren, wie  
15 beispielsweise direktes, anodisches, eutektisches, ad-  
häsives oder Glass-Fritt Waferbonden, erfolgt.
12. Verfahren nach Anspruch 11,  
dadurch gekennzeichnet,  
20 dass die Haftfestigkeit zwischen Halbleitersubstrat (1)  
und Trägersubstrat (2) durch die Wahl der Parameter für  
das Waferbonden oder eine gezielte Nachbehandlung defi-  
niert eingestellt bzw. erhöht wird.
- 25 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das Halbleitersubstrat (1) und/oder das Trägersub-  
strat (2) vor dem Verbinden auf einer Verbindungsfläche  
mit einer dünnen Oxidschicht versehen wird.  
30
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13,  
dadurch gekennzeichnet,

- 26 -

dass das Halbleitersubstrat (1) nach dem Verbinden mit dem Trägersubstrat (2) rückgedünnt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14,  
5 dadurch gekennzeichnet,  
dass das Bearbeiten des Halbleitersubstrates (1) das Zersägen in einzelne Einheiten umfasst.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15,  
10 dadurch gekennzeichnet,  
dass die Trennung des Halbleitersubstrats (1) vom Trägersubstrat (2) durch eine definierte Temperaturerhöhung und/oder den Zusatz eines flüssigen oder gasförmigen Mediums beschleunigt wird.

15  
17. Vorrichtung zur Trennung zweier verbundener Substrate bei einem Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche mit  
- einer Halterung (4) für die verbundenen Substrate,  
20 - zumindest einer Schneide (5) oder Spitze zum Erzeugen eines Anrisses in einem Verbindungsbereich zwischen den verbundenen Substraten, und  
- einer Vorschubeinrichtung (6) zum Einschieben der Schneide (5) oder Spitze in den Verbindungsbereich,  
25 dadurch gekennzeichnet,  
dass eine Steuerung zur Änderung der Vorschubgeschwindigkeit der Vorschubeinrichtung während des Einschiebens der Schneide (5) oder Spitze in den Verbindungsbereich vorgesehen ist.

30  
18. Vorrichtung nach Anspruch 17,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass mehrere Schneiden (5) oder Spitzen mit Vorschub-

- 27 -

beinrichtungen symmetrisch um die Halterung (4) angeordnet sind.

19. Vorrichtung nach Anspruch 17 oder 18,  
5 dadurch gekennzeichnet,  
dass an jeder Schneide (5) oder Spitze eine Kraftmes-  
seinrichtung vorgesehen ist, die die über die Schneide  
oder Spitze auf den Verbindungsbereich ausgeübte Kraft  
während des Einschiebens misst und mit der Steuerein-  
10 heit verbunden ist, die die Vorschubeinrichtung(en) (6)  
in Abhängigkeit von der gemessenen Kraft ansteuert.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 17 bis 19 ,  
dadurch gekennzeichnet,  
15 dass die Schneiden (5) trapezförmig ausgestaltet sind.

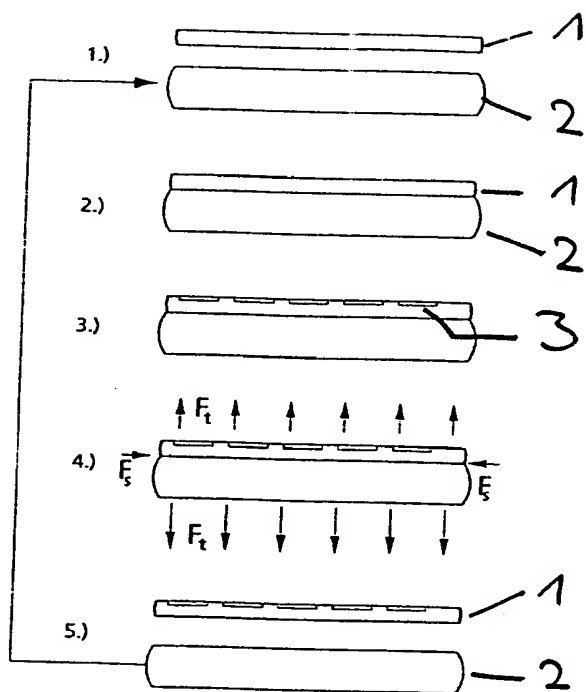


Fig. 1

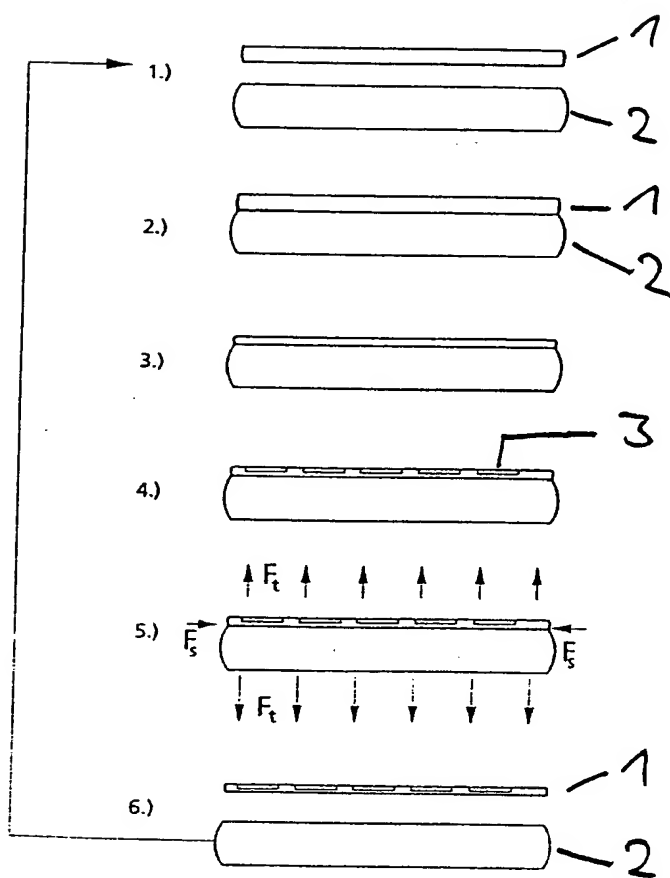
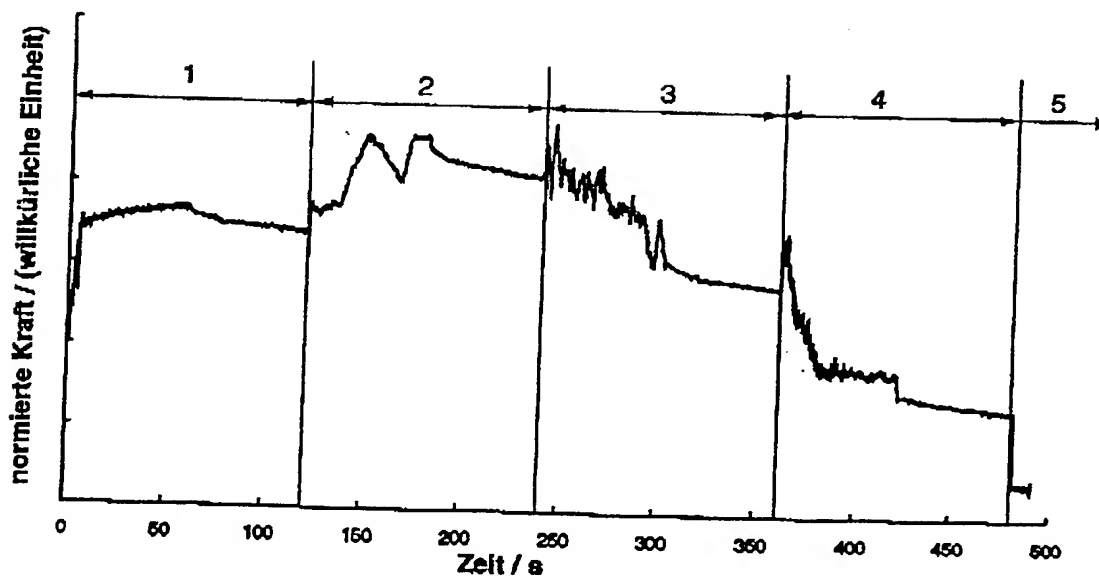
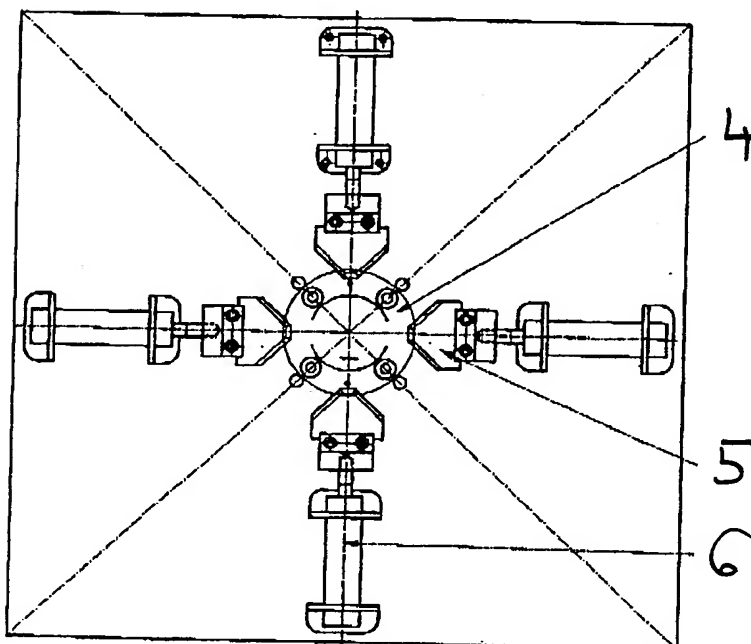


Fig. 2

fig. 4fig. 3

